

## Sugeno 형태 퍼지 논리를 이용한 로봇 매니플레이터의 독립관절 적응제어

김영태<sup>#</sup>

### Independent Joint Adaptive Control of Robot Manipulator Using the Sugeno-type of Fuzzy Logic

Young-Tae Kim<sup>#</sup>

#### ABSTRACT

Control of multi-link robot arms is a challenging and difficult problem because of the highly nonlinear dynamics. Independent joint adaptive scheme is developed for control of robot manipulators based on Sugeno-type of fuzzy logic. Fuzzy logic system is used to approximate the coupling forces among the joints, coriolis force, centrifugal force, gravitational force, and frictional forces. The proposed scheme does not require an accurate manipulator dynamic, and it is proved that closed-loop system is asymptotic stable despite the gross robot parameter variations. Numerical simulations for three-axis PUMA robot are included to show the effectiveness of controller.

**Key Words** : Fuzzy control (퍼지제어), Adaptive control (적응제어), Independent joint control (독립관절제어), Robot control (로봇제어)

#### 1. 서론

로봇 매니플레이터는 여러 개의 관절이 연결되어 있어 구조적으로 특성이 매우 복잡하고 비선형적이다. 특히 경우에 따라서 발생하는 외란 그리고 미지의 부하나 마찰력 또는 로봇이 빠른 속도로 움직일 경우에 모델의 불확실성은 제어 시스템에서 관심을 기울여야 할 문제들이다. 지난 수 년동안 이러한 문제를 좀더 효율적으로 해결하기 위한 여러 방법이 많은 연구자들에 의하여 다루어져 왔는데 그 중 흥미롭게 논의 되는 분야 중 하나는 대형 시스템 제어(large-scale system control)에

많이 쓰이는 분산제어 방법이다. 특히 적응 퍼지 이론을 다 관절 로봇 매니플레이터에 적용할 경우 입력 변수들의 증가에 의하여 퍼지 규칙이 지수적으로 증가하기 때문에 실시간 제어하기에는 매우 어려워지게 된다.

이러한 문제점들을 해결하는 차원으로서 계산 시간을 줄일 수 있으며 간단하게 구현할 수 있는 분산 제어 방법은 많은 연구자들에 의하여 관심의 대상이 되고 있다<sup>1-9</sup>.

최근 몇몇 연구자<sup>10-13</sup> 들이 퍼지 논리, 슬라이딩모드 이론, 그리고 적응 이론을 하나로 조합하여 시스템의 습득 능력, 보편 근사 능력, 적응 능

... 2002년 10월 22일 접수  
# 교신저자, 동국대학교 전기공학과  
Email : youngtae@dongguk.edu

력, 그리고 외란을 줄일 수 있는 적응퍼지 슬라이딩모드 제어방법을 제안하였다.

퍼지 논리 제어는 시스템의 수학적 모델 얻기가 어렵거나 불가능한 것을 보완하기 위하여 전문가의 지식과 경험을 이용할 수 있는 제어 방법이다.

퍼지 제어 시스템의 체계적인 분석과 설계 방법을 살펴보면, Sugeno<sup>14</sup>는 Takagi-Sugeno 퍼지 모델이라 불리는 새로운 종류의 퍼지 추론 시스템을 제안 하였다. 이는 퍼지 이론의 유연성과 엄밀한 수학적 분석 도구를 하나의 융합된 틀로 합치는 방법이다. Sugeno 퍼지 모델은 결론부가 선형 함수로 이루어져 있으므로 퍼지 논리 제어기의 분석에 유용한 모델이다. Buckley<sup>15</sup>은 Sugeno 형태의 제어기로 콤팩트 집합 안에 있는 어떠한 종류의 연속이며 실수인 함수를 어떤 정도의 정확성으로 항상 근사화 할 수 있음을 보였다. Wang<sup>16</sup>은 퍼지 기저 함수의 개념을 도입하여 비선형 시스템에 대한 적응퍼지 제어기의 안정도 해석에 대한 수학적 틀을 구축하였으며 퍼지 논리 시스템은 콤팩트(compact) 입력공간에서 어떤 정도의 정확성에 대하여 모든 비선형 함수를 균일하게 근사화 할 수 있음을 보였다. Jin<sup>17</sup>은 유전 알고리즘과 gradient 방법을 조합하여 로봇 매니플레이터를 분산 적응퍼지제어 할 수 있는 방법을 제시하였으며, Zhang과 Feng<sup>18</sup>은 슬라이딩모드 제어와 퍼지 집합을 근거로 한 분산 적응퍼지 제어방법을 제안하였다. Lo와 Kuo<sup>19</sup>는 단지 5개의 퍼지 제어 규칙으로 4차 비선형 시스템을 점근적으로 안정시킬 수 있는 비결합(decoupling) 방법을 개발하였다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 문제점들을 해결하기 위한 분산 이론, 퍼지 논리, 그리고 적응 제어 개념을 조합한 제어방법을 제시하였다. 제안된 제어 이론은 로봇 매니플레이터의 정확한 동적 모델을 요구하지 않으며 여과된 추적오차(filtered tracking error)  $e_f$ 을 소개 함으로서 기존의 PID (Proportional, Integral, and Derivative) 제어기의 장점을 적응퍼지 제어에 접목하여 성능을 향상시킬 수 있다. 특히 적분 항을 고려함으로써 정상 상태 오차를 줄일 수도 있다. 궤환 항(feedback term)은 Lyapunov 함수의 일차 미분 값이 확실히 음의 부호를 갖게 하기 위하여 고려하였다. 결과적으로 점 근적으로 안정됨을 수학적 증명을 통하여 보여주었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서

는 Sugeno 형태의 퍼지 논리 시스템 구조를 보여 주었으며<sup>16</sup>, 3절에서는 독립관절 적응퍼지 제어이론을 소개하였다. 4절에서는 2절에서 제안한 제어 방법을 3관절 PUMA 로봇 팔에 적용하여 그 효율성을 모의 실험을 통하여 입증하였다.

## 2. 퍼지 논리 시스템

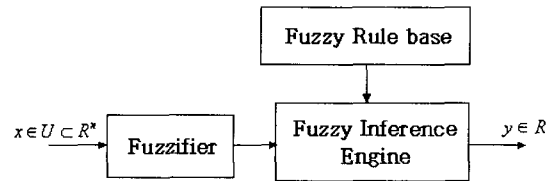


Fig. 1 The basic configuration of a fuzzy logic system

보편적으로 3가지 형태의 퍼지 시스템이 있는데 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 sugeno 형태의 퍼지 시스템을 고려하였다. 벡터공간  $x \in U \subset R^n$ 에서  $y \in R$ 로의 대응(mapping)을 나타내는 퍼지 논리 시스템의 지식베이스는 입력과 출력 그리고 AND 와 OR 같은 퍼지 연산자와 연합한 언어적 변수들의 집합으로 구성된 퍼지 IF-THEN 규칙들을 의미한다. 식(1)은 sugeno 형태 퍼지모델의 l 번째 규칙을 나타낸다.

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^l, \\ \text{THEN } y^l(x) = k_1^l x_1 + k_2^l x_2 + \dots + k_n^l x_n \quad (1)$$

여기서,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U \subset R^n$  와  $y^l(x) \in R$ 은 퍼지 논리 시스템의 입력과 출력을 나타낸다.  $A_i^l$ 은  $U$  공간에서의 퍼지 집합이며  $k_i^l$ 은 퍼지 규칙의 결론부의 계수이다.  $i=1,2,\dots,n$ 은 퍼지 입력의 수,  $l=1,2,\dots,m$ 은 퍼지 규칙의 수를 나타낸다.

퍼지 IF-THEN 규칙(1)은 다음과 같은 형태의 퍼지조건 명제<sup>20</sup>로 표현할 수 있다.

$$A_1^l \times A_2^l \times \dots \times A_n^l \rightarrow y^l(x) \quad (2)$$

여러 종류의 퍼지 조건 명제 규칙이 있는데 본 논문에서는 적 연산규칙<sup>20</sup>과 t-norm<sup>20</sup>을 사용하였고 fuzzifier는 보통 점  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U \subset R^n$ 을 퍼지집합으로의 대응을 말하며 singleton fuzzifier

<sup>20</sup> 을 사용하였다. 결과적으로 sugeno 퍼지 시스템의 출력  $y(x)$  는 식(3)과 같은 가중치 평균으로 표현 할 수 있다<sup>10</sup>.

$$y(x) = \frac{\sum_{l=1}^m w^l (k_1^l x_1 + \dots + k_n^l x_n)}{\sum_{l=1}^m w^l} \quad (3)$$

여기서, 가중치  $w^l$  은

$$w^l = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \quad (4)$$

만일 소속 함수  $\mu_{A_i^l}(x_i)$  를 고정시키고  $k_i^l$  을 조정 가능한 변수로 보면, 식(3)은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$y(x) = \varphi^T \xi(x) \quad (5)$$

여기서,  $\varphi = (k_1^1, \dots, k_n^1, k_1^2, \dots, k_n^2, \dots, k_1^n, \dots, k_n^n)^T$  은 변수 벡터이며,  $\xi(x) = (\xi_1^1(x), \dots, \xi_n^1(x), \xi_1^2(x), \dots, \xi_n^2(x), \dots, \xi_1^n(x), \dots, \xi_n^n(x))^T$  은 다음과 같은 형태의 회귀 벡터(regressive vector)로 볼 수 있다.

$$\xi_j^l(x) = \frac{(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)) x_j}{\sum_{i=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i))} \quad (6)$$

식(5)와 같은 형태의 퍼지 논리 시스템은 보편적 근사기임을 알 수 있으며<sup>15,16,20</sup> 콤팩트(compact) 입력 공간에서 어떠한 정도의 정확성에 대하여 모든 비선형 함수를 균일하게 근사화 할 수 있다.

### 3. 독립관절 적응퍼지 제어기 설계

일반적으로  $n$  차 자유 매니퓰레이터의 Lagrange-Euler 운동 방정식을 행렬 벡터 표기로 표시하면 다음과 같다<sup>6</sup>.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + H(\dot{\theta}) = \tau \quad (7)$$

여기서,  $\theta(t)$ 는  $n \times 1$  관절 각 위치 벡터,  $\tau(t)$ 는  $n$

$\times 1$  적용 토크 벡터,  $G(\theta)$ 는  $n \times 1$  중력 벡터,  $M(\theta)$ 는  $n \times n$  대칭 양 한정(symmetric positive-definite) 관성 벡터,  $N(\theta, \dot{\theta})$ 는  $n \times 1$  Coriolis와 원심력 벡터, 그리고  $H(\dot{\theta})$ 는  $n \times 1$  마찰력 벡터이다.  $M(\theta)$ ,  $N(\theta, \dot{\theta})$ ,  $G(\theta)$ , 그리고  $H(\dot{\theta})$ 은  $\theta(t)$ 와  $\dot{\theta}(t)$ 로 결합된 비선형 함수이다.

매니퓰레이터의 동적 방정식(7)은 각각의 관절 운동 사이에 매우 밀접한 상호 작용이 있으며 특히 Coriolis 와 원심력은 매니퓰레이터가 빠른 속도로 움직일 경우 무시할 수 없는 부분이다. 매니퓰레이터의 제어문제는 관절 각 벡터  $\theta(t)$ 가 기준이 되는 각 벡터  $\theta_d(t)$ 를 가능한 정확하게 추적할 수 있도록 관절 토크  $\tau(t)$  을 얻을 수 있는 제어방법을 개발하는 것이다. 다 관절 로봇 시스템은 각각의 관절이 결합력(coupling force)에 의해 상호 연결된 종속 시스템(subsystem)들로 구성된 대형 시스템(large-scale system)으로 생각할 수 있다. 여기서, 결합력(coupling force)은 식 (7)에서 볼 수 있듯이 관성력, Coriolis, 원심력, 마찰력, 그리고 중력에 의하여 생기게 된다. 그러므로 매니퓰레이터의 동적 방정식 (7)은 다음과 같은  $n$ 개의 2차 비선형 스칼라 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n m_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j(t) + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

여기서, 관성 행렬  $M(\theta)$ 는 양 한정(positive-definite)이기 때문에  $m_{ii}(\theta)$ 는 항상 양수이며  $i$  번째 관절에서의 시 변 유효 관성으로 볼 수 있다.

결과적으로 식 (7)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{ii}(\theta)\ddot{\theta}_i(t) + d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

여기서,

$$d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n m_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j(t) + n_i(\theta, \dot{\theta}) + g_i(\theta) + h_i(\dot{\theta}) \quad (10)$$

식(9)는 관절 토크  $\tau_i(t)$  을 가진  $i$ 번째 종속 시스템(subsystem)의 입출력 동적 모델로서 생각 할 수 있으며,  $d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  는  $i$ 번째 관절에서 다른 관절

과의 관성 연결효과는 물론 중력, 마찰, Coriolis 그리고 원심토크를 포함하는 외란 토크로 고려할 수 있다. 이러한 견해로부터  $d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  은  $i$  번째 종속 시스템과 나머지 다른 종속 시스템들 사이의 결합(coupling)을 나타낸다. 따라서 관절 제어를 분산화할 수 있으며 분산 매니플레이터 제어문제는  $i$  번째 관절 토크  $\tau_i(t)$ 을 독립적으로 얻을 수 있는 관절 제어를 설계하는 문제로 생각할 수 있다.

분산 제어기를 설계하기 위하여 식(11)과 같은 여과된 추적 오차(filtered tracking error)를 정의하자.

$$e_i(t) = \hat{\theta}_i - \dot{\theta}_r \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

여기서,  $\hat{\theta}_i = \dot{\theta}_i - k_{i1}(\theta_i - \theta_{d_i}) - k_{i2} \int_0^t (\theta_i - \theta_{d_i}) dt$  이며,  $\theta_{d_i}$  는  $i$  번째 관절에서의 기준 변위 각이다.

식(9)과 식(11)로부터 식(12)을 얻을 수 있으며

$$\begin{aligned} m_{ii} \dot{e}_i(t) &= m_{ii}(\theta) \ddot{\theta}_i(t) - m_{ii}(\theta) \ddot{\theta}_r(t) - \Delta m_i \dot{e}_i \\ &= -d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) - m_{ii}(\theta) \ddot{\theta}_r(t) + \tau_i(t) - \Delta m_i \dot{e}_i \\ &= f_i + \tau_i(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $f_i = -d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) - m_{ii}(\theta) \ddot{\theta}_r(t) - \Delta m_i \dot{e}_i$  는 비선형 함수이고,  $m_{ii}(\theta)$  는 항상 양수인  $i$  번째 관절의 시 변 유효 관성이므로 기준경로가 주어지면 항상 최소 한계 값  $m_{ii}$  가 존재한다. 즉

$$0 < m_{ii} < m_{ii}(\theta), \quad m_{ii}(\theta) = m_{ii} + \Delta m_i(\theta)$$

만일 유효 관성  $m_{ii}(\theta)$  와  $i$  번째 종속 시스템과 나머지 다른 종속 시스템 사이의 결합 토크를 나타내는 외란 토크  $d_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  을 정확히 알 수 있다면 최적 제어기<sup>21</sup> 를 쉽게 설계할 수 있으나 실제적인 문제에서는 비선형 함수  $f_i$  의 정확한 값을 얻기가 어려워 지는데 만일 가능한 시스템 정보를 최대한 활용할 수 있다면  $f_i$  는 known function  $f_{ki}$  와 시스템의 불확실성을 나타내는 unknown function  $f_{ui}$  의 합으로 볼 수 있다. 즉

$$f_i = f_{ki} + f_{ui}$$

여기서, 만일 가능한 시스템 정보가 없다면  $f_{ki}$  을 단순히 zero로 놓으면 된다. 따라서 본 논문에서는 불확실성을 나타내는 함수  $f_{ui}$  을 식(5)의 형태인 퍼지 논리 시스템  $\hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i)$  로 대체하여 식(13)와 같은  $i$  번째 관절에서의 적응 퍼지 제어기(adaptive fuzzy controller)를 제안하자.

$$\tau_i(t) = -f_{ki} - \hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i) - k_{i3}e_i(t) \quad (13)$$

여기서  $k_{i3}e_i(t)$  는 Lyapunov 함수의 미분 값  $\dot{v}_i$  을 더 적은 음수로 만들기 위하여 고려하였다.

Fig. 2는 매니플레이터의  $i$  번째 관절의 적응 퍼지 제어의 구현을 나타내며 식(13)을 식(12)에 대입하면,

$$m_{ii} \dot{e}_i(t) = f_{ui} - \hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i) - k_{i3}e_i(t) \quad (14)$$

다음과 같은 최소 근사 오차(minimum approximation error)  $w_i$  를 정의하자.

$$w_i = f_{ui} - \hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i^*) \quad (15)$$

여기서,  $\varphi_i^*$  는 퍼지 논리 시스템의 최적 변수 벡터이다. 그러면,

$$m_{ii} \dot{e}_i(t) = -k_{i3}e_i(t) + \hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i^*) - \hat{f}_{ui}(\theta|\varphi_i) + w_i \quad (16)$$

$\hat{f}_{ui}$  을 식(5)와 같은 형태의 퍼지 논리 시스템으로 대체하면 식(16)은 다음과 같다.

$$m_{ii} \dot{e}_i(t) = -k_{i3}e_i(t) + \phi_i^T \xi_i(\theta) + w_i \quad (17)$$

여기서,  $\phi_i = \varphi_i^* - \varphi_i$ , 그리고  $\xi_i(\theta)$  은 식(6)와 같은 퍼지 기저 함수이다.

$i$  번째 관절의 안정도 해석을 위하여 다음과 같은 Lyapunov 함수를 고려하자.

$$v_i = \frac{1}{2} m_{ii} e_i^2 + \frac{1}{2r_i} \phi_i^T \phi_i \quad (18)$$

여기서,  $e_i$  는 식(11)이며  $r_i$  는 양의 상수 값이다. 여과된 추적 오차(filtered tracking error)를 따라  $v_i$

를 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{v}_i &= m_{ii} e_i \dot{e}_i + \frac{1}{r_i} \phi_i^T \dot{\phi}_i \\ &= e_i [-k_{i3} e_i(t) + \phi_i^T \xi_i(\theta) + w_i] - \frac{1}{r_i} \phi_i^T \dot{\phi}_i \\ &= -k_{i3} e_i^2 + \frac{1}{r_i} \phi_i^T [r_i e_i \xi_i(\theta) - \dot{\phi}_i] + e_i w_i \end{aligned} \quad (19)$$

$e_i w_i$  는 최소 근사 오차와 비슷한 값이며 보편적 근사 정리<sup>10</sup>에 의하여  $w_i$  는 매우 작은 값이 됨을 알 수 있다. 만일 식(20)와 같은 적응 법칙을 선택하면,

$$\dot{\phi}_i = r_i e_i \xi_i(\theta) \quad (20)$$

그러면 식(21)을 항상 만족시키는 양수  $k_{i3}$  을 얻을 수 있다.

$$\dot{v}_i < 0 \quad (21)$$

Barbalat의 정리<sup>22</sup>를 사용하면,  $e_i$  가 영으로 수렴함을 알 수 있다. 식(11)로부터  $e_i$  가 영(zero)으로 수렴하면 위치 추종 오차 ( $\theta_i - \theta_{di}$ ) 도 영(zero)으로 수렴하게 되며 따라서  $i$  번째 종속 시스템은 점근적으로 안정하게 된다. 전체적인 점근적 안정함(global asymptotic stability)을 보이기 위하여 식(9)와 같은  $n$ 개의 종속 시스템을 통합하고 Lyapunov함수  $v_i$  를 포함한 Lyapunov 함수  $v$  를 고려하면  $v > 0$  와  $\dot{v} < 0$  임을 알 수 있다. 따라서 시스템은 독립관절 적응 퍼지 제어기로 전체적인 점근 안정함을 알 수 있다.

#### 4. 모의 실험

앞 절에서 제안한 독립관절 적응퍼지 제어기의 효율성을 보기 위하여 실제적인 환경 조건에서 시스템의 성능을 모의실험을 통하여 조사하였다. 본 논문에서는 PUMA 로봇 팔의 첫번째 3개의 연결 관절인 베이스, 어깨, 팔꿈치를 고려한 3관절 PUMA600 로봇의 동 특성 방정식<sup>23,24</sup>을 고려하였는데 그 형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m_{11}(\theta) & m_{12}(\theta) & m_{13}(\theta) \\ m_{21}(\theta) & m_{22}(\theta) & m_{23}(\theta) \\ m_{31}(\theta) & m_{32}(\theta) & m_{33}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(\theta, \dot{\theta}) \\ n_2(\theta, \dot{\theta}) \\ n_3(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} g_1(\theta) \\ g_2(\theta) \\ g_3(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(\dot{\theta}) \\ h_2(\dot{\theta}) \\ h_3(\dot{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

여기서,  $m_{ij}(\theta)$ ,  $n_i(\theta, \dot{\theta})$ ,  $g_i(\theta)$  그리고  $h_i(\dot{\theta})$  는 Lee<sup>23</sup>와 Bejczy<sup>24</sup>을 참조 하였으며 Matlab Simulink 를 이용한 모의실험에서 사용되어진 변수값들은 다음과 같다.

- 기준 궤적 경로

$$\theta_{d1}(t) = 0.15[0.8\pi - \sin(0.8\pi)]$$

$$\theta_{d2}(t) = 0.15[-0.8\pi + \sin(0.8\pi)]$$

$$\theta_{d3}(t) = 0.3[0.8\pi - \sin(0.8\pi)]$$

- $m_1 = 2.27kg$ ,  $m_2 = 15.91kg$ ,  $m_3 = 11.36kg$

- $k_{11} = 10$ ,  $k_{12} = 50$ ,  $k_{13} = 80$

- $k_{21} = 10$ ,  $k_{22} = 50$ ,  $k_{23} = 80$

- $k_{31} = 10$ ,  $k_{32} = 50$ ,  $k_{33} = 80$

- $r_1 = 40000$ ,  $r_2 = 60000$ ,  $r_3 = 80000$

- 질량변화 ( $t=1.5$  sec)  $m_1 = 2.27kg \rightarrow 2kg$

$$m_2 = 15.91kg \rightarrow 13kg \quad m_3 = 11.36kg \rightarrow 6kg$$

로봇 매니플레이터의 두개의 다른 초기 위치  $\theta_0 = (0,0,0)^T$  와  $\theta_0 = (0.3, -0.3, 0.3)^T$  를 선정하여 기준 궤적 경로 추적을 살펴 보면 Fig. 3 과 Fig. 4 는 관절각  $\theta_1(t)$ ,  $\theta_2(t)$  그리고  $\theta_3(t)$  의 시간에 대한 응답을 나타내며 초기 위치가 큰 차이가 있을 경우에도 빠른 시간 안에 기준 궤적 경로로 잘 추적함을 볼 수 있다. Fig. 5 는 매니플레이터의 관절 오차각의 시간에 대한 응답이다. 논문에서 제시한 제어기의 적응성(adaptability)을 보기 위하여 모의 실험에서 가상적으로 로봇 운반체(payload)의 질량변화를  $t=1.5$  초에 주었는데 이러한 변화에도 불구하고 시간에 대한 응답을 보면 약간의 변화는 있었으나 곧바로 기준 궤적으로 잘 추적함을 알 수 있다. Fig. 6 은 시간에 대한 각 관절에서의 제어 토크를 나타내며 모의실험을 통하여 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 독립 관절 적응퍼지 제어 방법은 각 관절사이의 연결력(coupling force)이나 부하관성(load inertia) 혹은 점성 마찰(viscous friction)의 변화로 인하여 매니플레이터의 정확한 모델을 얻을 수

없는 경우에도 좋은 특성을 보였다.

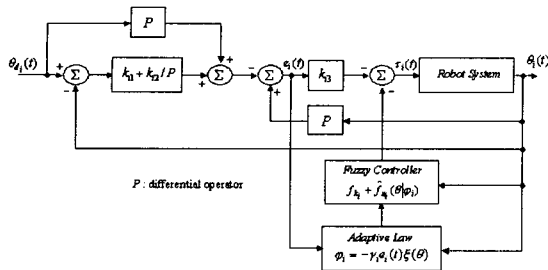


Fig. 2 Robot control system with independent joint adaptive fuzzy controller

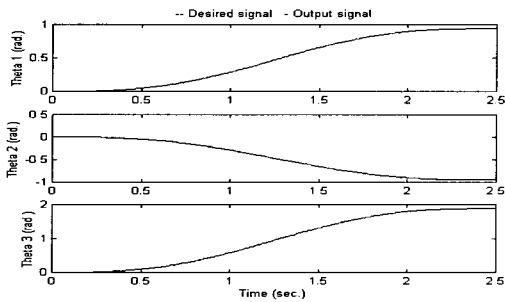


Fig. 3 Trajectories of the joint angles for initial position (0,0,0)

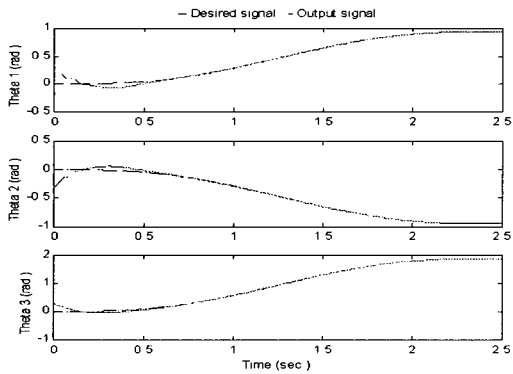


Fig. 4 Trajectories of the joint angles for initial position (0.3,-0.3,0.3)

### 5. 결론

본 논문에서는 Sugeno 형태 퍼지 논리시스템을 이용하여 로봇 매니플레이터의 독립 관절 적응

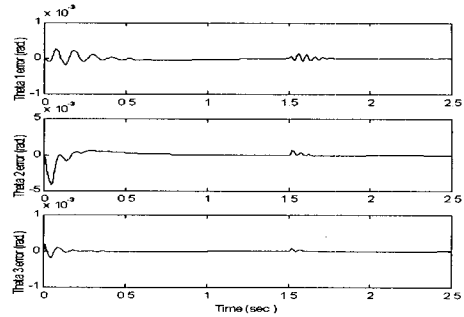


Fig. 5 Robot joint angle tracking errors for sudden Load change at t=1.5sec and initial position (0,0,0)

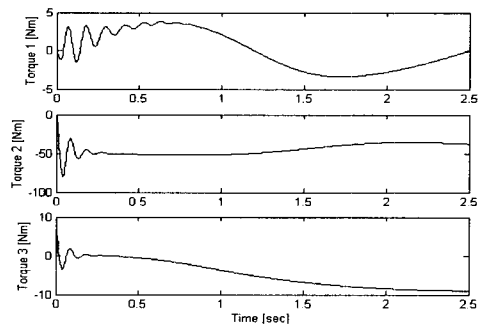


Fig. 6 Trajectories of the joint torque for initial position (0,0,0)

퍼지 제어를 제안하였고 알 수 없는 비선형 함수(즉, 관절간의 연결력, 마찰력, 부하 변동에 따른 외란 등)를 보편적 근사화 할 수 있음을 보였다. 다 관절 로봇을 제어할 경우 입력 변수들의 증가에 의하여 퍼지 규칙이 지수적으로 상당히 증가하기 때문에 논문에서 제시한 독립 관절 제어 알고리즘은 집중 제어 방법보다 실시간 제어하는데 있어서 계산 시간을 많이 줄일 수 있으며 간단하게 구현 할 수 있는 커다란 장점이 있음을 보였다. 여과된 추적오차(filtered tracking error)  $e_i$ 을 소개함으로써 기존의 PID(Proportional, Integral, and Derivative) 제어기의 장점을 적응퍼지 제어에 접목하여 성능을 향상 시킬 수 있었으며 특히 적분항을 고려함으로써 정상 상태 오차를 줄일 수도 있었다. Lyapunov 함수를 이용하여 독립 관절 적응퍼지 제어기로 로봇 매니플레이터의 정확한 모델 없이도 안정화 시킬 수 있었으며 모의 실험을 통하여 제어기의 효율성도 입증하였다.

## 후 기

본 연구는 동국대학교 연구비 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- Ozguner, U. and Hemami, H. "Decentralized Control of Interconnection Physical System," *Int. J. Control* 41, pp. 1445-1459, 1985.
- Gavel, D. T. and Hsia, T. C. "Decentralized Adaptive Control of Robot Manipulator," *Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation*, pp. 1230-1235, 1987.
- Choi, Y. K. and Bien, Z., "Decentralized Adaptive Control Scheme for Control of a Multi-Arm-type Robot," *Int. J. Control* 48, pp. 1715-1722, 1988.
- Vukobratovic, M. and Kircanski, N., "Decoupled Control of Robots via Asymptotic Regulators," *IEEE Trans. Automatic Control* AC-28, 1983.
- Oh, B. J., Jamshidi, M. and Seraji, H., "Decentralized Adaptive Control," *Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, pp. 1016-1021, 1988.
- Seraji, H., "Decentralized Adaptive Control of Manipulators : Theory, Simulation, and Experimentation," *IEEE Trans. Robotic and Automation* 5, pp. 183-201, 1989.
- Jamshidi, M., Seraji, H. and Kim, Y. T. "Decentralized Control of Nonlinear Robot Manipulator," *Robotics* 3, pp. 361-370, 1987.
- Ioannou, P. A., "Decentralized Adaptive Control of Interconnected System," *IEEE Trans. Automatic control* AC-31, pp. 291-298, 1986.
- R. G. Morgan and U. Ozguner, "Decentralized variable structure control algorithm for robot manipulator," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1985.
- Tsay, D. L., Chung, H. Y. and Lee, C. J., "The Adaptive Control of Nonlinear Systems using the Sugeno-type of Fuzzy Logic," *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 2, April 1999.
- Hsu, Y. C., Member, IEEE, Chen, G., Fellow, IEEE and Li, H. X., Senior Member, IEEE, "A Fuzzy Adaptive Variable Structure Controller with Applications to Robot Manipulators," *IEEE Trans. On Systems, MAN, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 31, No. 3, June 2001.
- Yoo, B. K., Member, IEEE and Ham, W. C., Member, IEEE, "Adaptive Control of Robot Manipulator using Fuzzy Compensator," *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 2, April 2000.
- Sun, F. C., Sun, Z. Q. and Feng, G., "An Adaptive Fuzzy Controller based on Sliding Mode for Robot Manipulators," *IEEE Trans. On Systems, MAN, and Cybernetics- Part B: Cybernetics*, Vol. 29, No. 4, Aug. 1999.
- Takagi, T. and Sugeno, M., "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control," *IEEE Trans. On Systems, MAN, and Cybern.*, 15, 1, pp. 116-132, 1985.
- Buckley, J. J., "Sugeno Type Controllers are Universal Controllers," *Fuzzy Sets and Systems*, 53, pp. 299-303, 1993.
- Wang, L. X. and Mendel, J. M., "Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least Squares Learning," *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 3, pp. 807-814, 1992.
- Jin, Y., "Decentralized Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulator," *IEEE Trans. SMC*, Vol. 28, pp. 47-57, Feb. 1998.
- Zhang, T. P. and Feng, C. B., "Decentralized Adaptive Fuzzy Control for Large-Scale Non Linear System," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 61-70, 1997.
- Lo, J. and Kuo, Y. H., "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control," *IEEE Trans. On System*, Vol. 6, pp. 426-435, Aug. 1998.
- Wang, L. X., "Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis," Prentice-Hall, 1994.
- Sastry, S. and Bodson, M., "Adaptive Control : Stability," Convergence and Robustness. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1989.
- Slotine, J. J. E. and Li, W. "Applied Nonlinear Control," Englewood Cliffs, NJ : Prentive-Hall, 1991.
- Lee, C. S. G., Lee, B. H. and Nigam, R., "An Efficient Formalation of Robot Arm Dynamics for Control Analysis and Manipulator Design," Technical Report, RSD-TR8-82, Center of Robotics and Integrated Manufacturing, University of Michigan
- Bejczy, A. K., "Robot Arm Dynamics and Control," Technical Memorandum, JPL, pp. 33-669, 1974.